

О. Г. Трофимова  
УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург  
o.g.trofimova@mail.ru

## ТЭЧ-ГРАФЫ В АНАЛИЗЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ

Приведены математические модели в виде сигнального графа для оценки энерго-экологической эффективности процессов и производств.

*Ключевые слова:* сквозной энерго-экологический анализ процессов, технологические экологические числа.

The mathematical model in the form of signal count to assess the energy and environmental performance of processes and industries.

*Keywords:* the crosscutting energy and environmental analysis process, the technological environmental numbers.

Метод сквозного энергетического анализа производства [1] основан на фундаментальном понятии – топливное технологическое число (ТТЧ), измеряемое в килограммах условного топлива (у. т.) на тонну продукции. С целью получения единого показателя энергоемкости и экологичности производства и для проведения сквозного энерго-экологического анализа введено технологическое экологическое число (ТЭЧ) [2]. ТЭЧ оценивает экологически вредные выбросы (ЭВВ) в атмосферный воздух загрязняющих веществ, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты и размещение отходов производства и потребления, которые образуются при сжигании топлива и использовании энергии. Этот параметр имеет единицу измерения кг у. т./т продукции и определяется по формуле

$$\text{ТЭЧ}_n = m_n \frac{C_{\text{вв}} Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}}}{C_{\text{пр.г.}} Q_{\text{н.усл.т.}}^{\text{р}}} = m_n \cdot C_{\text{вв}} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $m_n$  – удельная масса  $n$ -го ЭВВ в тоннах на тонну продукции (т выбр./т прод.);  $C_{\text{вв}}$  – норматив платы за выброс (сброс, размещение отходов) тонны загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов выбросов  $n$ -го ЭВВ (руб./т выбр.);  $C_{\text{пр.г.}}$  – средняя цена природного газа (3,5 руб./м<sup>3</sup>);  $Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}} = 35,8$  МДж/м<sup>3</sup> – низшая рабочая теплота сгорания природного газа,  $Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}} = 29,309$  МДж/кг у. т. – низшая рабочая теплота сгорания у. т. Коэффициент приведения  $K_{\text{пр}}$  при заданных параметрах

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}}}{C_{\text{пр.г.}} Q_{\text{н.усл.т.}}^{\text{р}}} = 0,35. \quad (2)$$

Для оценки энерго-экологической эффективности процессов и производств рассмотрим математические модели в виде ТЭЧ-графа. Характеристикой технологической цепочки (передела) является общее ТЭЧ, которое обозначим  $ТЭЧ_{C1}$ , индекс  $C$  – признак сквозного или общего ТЭЧ.

На каждом переделе имеется несколько локальных источников ЭВВ, обозначим их как компоненты с символом  $L$  и двумя индексами:  $k$  – номер источника ЭВВ,  $i$  – номер передела  $L_{ki}$ . Обозначим  $m_{Lki}$ , как удельную массу ЭВВ  $k$ -го источника, характеризующего локальные ЭВВ на  $i$ -м переделе, за вычетом полезно-используемых выбросов.

Принципы сквозного анализа требуют учитывать ЭВВ от всех сторонних источников. Под сторонним компонентом понимается любая компонента (источник ЭВВ), которая пересчитывается из других переделов на ЭВВ  $i$ -го передела. Сторонний ЭВВ имеет три индекса:  $j$  – номер передела, с которого пересчитывается ЭВВ,  $k$  – номер источника на  $j$ -м переделе,  $i$  – номер передела, на который пересчитывается ЭВВ. Обозначим  $m_{jki}$ , как удельную массу ЭВВ от стороннего  $k$ -го источника с  $j$ -го передела, пересчитанную на  $i$ -й передел.

На  $i$ -м переделе ТЭЧ можно рассматривать как сумму локальных и сторонних ТЭЧ. Локальные ТЭЧ определяются по формуле:

$$ТЭЧ_{Lki} = m_{Lki} \cdot C_{\text{вв}Lk} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{вв}Lk}$  – норматив платы за выброс для  $k$ -го источника ЭВВ.

ТЭЧ от сторонних источников ЭВВ определяются по формуле:

$$ТЭЧ_{jki} = \varphi_{\Sigma jki} \cdot m_{jki} \cdot C_{\text{вв}jk} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где  $\varphi_{\Sigma jki}$  – сквозной коэффициент передачи ЭВВ на  $j$ -й передел от  $k$ -го источника  $i$ -го передела;  $C_{\text{вв}jk}$  – норматив платы за выброс для  $k$ -го источника ЭВВ  $j$ -го передела.

Сквозное значение ТЭЧ  $i$ -го передела определяется суммами

$$ТЭЧ_i = \sum_{M_i} ТЭЧ_{Lki} + \sum_{N_j} ТЭЧ_{jki}, \quad (5)$$

где  $M_i$  – количество локальных источников ЭВВ на  $i$ -м переделе;  $N_j$  – количество сторонних источников на  $j$ -м переделе.

ТЭЧ-граф – это разновидность сигнального графа. В ТЭЧ-графе любая вершина может генерировать локальный сигнал – значение ТЭЧ. Множество вершин ТЭЧ-графа разбито на непересекающиеся подмножества вершин, которые характеризуют компоненты ТЭЧ одного передела (расположенные друг под другом в виде столбца). Вершины обозначаются двумя индексами, что обусловлено разбиением множества вершин на подмножества. Первый индекс может быть буквой или цифрой, он определяет порядковый номер стороннего компонента ТЭЧ для этого передела. Второй индекс соответствует номеру передела. Дуги идут из вершин одного передела в вершины другого, задавая взаимосвязь между соответствующими

щими типам ТЭЧ разных переделов. Дугам этого графа поставлены в соответствие коэффициенты передачи, или операторы преобразования, в виде расходных коэффициентов  $\varphi_{\alpha i}^{\beta j}$ . Они обозначаются двумя парами индексов, где верхний индекс  $j$  соответствует номеру передела, от которого переходит часть ЭВВ к  $i$ -у переделу. Индексы  $\alpha$  и  $\beta$  соответствуют порядковым номерам компонентов ТЭЧ соответствующего передела. Верхняя пара индексов задает вершину-источник, из которой выходит дуга, а нижняя пара индексов определяет вершину-приемник, в которую входит дуга.

На рис. 1 представлен пример диаграммы ТЭЧ-графа.

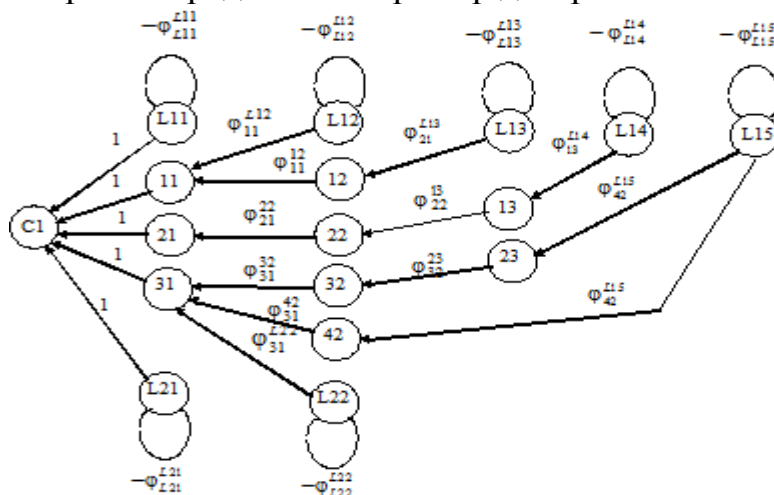


Рис. 1. Пример диаграммы ТЭЧ-графа

В обозначениях вершин опущена аббревиатура «ТЭЧ», оставлены лишь индексы, идентифицирующие тип ТЭЧ. Входные вершины ТЭЧ $_{Lki}$  могут содержать полезно-используемые ЭВВ, по этой причине они имеют петли. Петля с отрицательным коэффициентом  $\varphi_{Lki}^{Lki}$  определяет долю полезно-используемых выбросов, ТЭЧ которых принято вычитать из ТЭЧ локальных выбросов. Выходная вершина  $C1$  определяет сумму всех ТЭЧ первого передела. Диаграмму ТЭЧ-графа можно дополнить другими выходными вершинами ТЭЧ $_{Ci}$ , каждая из которых соответствует сумме ТЭЧ всех компонентов  $i$ -го передела для  $i = 2, n$ .

Для вершин сигнального ТЭЧ-графа, справедливо равенство

$$\text{ТЭЧ}_{\alpha i} = \sum_{j=1}^n \varphi_{\alpha i}^{\beta j} \text{ТЭЧ}_{\beta j}, \quad \beta \in \mathbf{B}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{B}$  – множество порядковых номеров вершин  $j$ -го передела, из которых идут дуги в вершину  $i$ -го передела с номером  $\alpha$ . Многократно используя эту формулу, с учетом древовидного характера ТЭЧ-графа можно связать ТЭЧ $_{Li}$  всех входных вершин с результирующим ТЭЧ $_{Ci}$  выходной вершины посредством сквозных коэффициентов передач.

Передача пути из входной вершины в выходную равна произведению  $n$  дуг, образующих этот путь. Между входной и выходной вершинами

может быть больше, чем один путь, обозначим их количество  $N_p$ . Сквозная передача из вершины  $Li$  в вершину  $Ci$  определяется суммой из произведений коэффициентов передач дуг, образующих соответствующие пути

$$\Psi_{Ci}^{Lj} = \sum_{N_p} \prod_n \varphi_{ai}^{bj} . \quad (7)$$

Определение сквозных коэффициентов передач эквивалентно исключению всех внутренних вершин ТЭЧ-графа. Полученный при этой операции двудольный ТЭЧ-граф типа «вход-выход» (рис. 2) позволяет наглядно увидеть все первичные составляющие ЭВВ. Значение ТЭЧ для выходной вершины определяется суммой

$$\text{ТЭЧ}_{Ci} = \sum_{N_L} \Psi_{Ci}^{Lj} \text{ТЭЧ}_{Lj}, \quad (8)$$

где  $N_L$  – число входных вершин, из которых имеются пути в соответствующую выходную вершину.

При построении модели в виде ТЭЧ-графов необходимо провести анализ множеств вершины графа, определить расходные коэффициенты для каждого компонента, определить входы и выходы графа, преобразовать множества вершин графа, рассчитать сквозные передачи.

Для примера построен ТЭЧ-граф аглодоменного производства стали и проведен расчет ТЭЧ. Результат отличается (более чем в 100 раз) с результатами [2], поскольку расчет ТЭЧ был основан на оплате природопользователя за сверхлимитное загрязнение окружающей среды. В настоящее время такого показателя нет, а норматив платы за выброс (сброс, размещение отходов) загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов выбросов уменьшился. Кроме того, возросли цены на природный газ. Таким образом, при действующем варианте цен величина ТЭЧ составляет 1–2 % от ТТЧ, что несопоставимо для проведения сквозного энерго-экологического анализа. Предлагается ввести оценочные ( $\alpha$ ) и весовые ( $\alpha$ ) коэффициенты:

$$\text{Оц}_{\text{ТТЭЧ}} = \alpha_1 \text{ТТЧ}_i / \text{ТТЧ}_{\max} + \alpha_2 \text{ТЭЧ}_i / \text{ТЭЧ}_{\max} = \alpha_1 \text{Оц}_{\text{ТТЧ}} + \alpha_2 \text{Оц}_{\text{ТЭЧ}}. \quad (9)$$

Это позволит изменить соотношение между ТТЧ и ТЭЧ, повысить статус экологической составляющей энерго-экологического анализа.

### Список литературы

1. Лисиенко В. Г. Методика расчета и использования технологических топливных чисел / В. Г. Лисиенко, С. Е. Розин, Я. М. Щелоков // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 2. С. 108–112.
2. Лисиенко В. Г. Методика сквозного энерго-экологического анализа энерготехнологических объектов / В. Г. Лисиенко, О. Г. Дружинина, В. А. Морозова // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 9. С. 61–65.